

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ГОРЕНИЯ «БЕЗГАЗОВОЙ» СИСТЕМЫ $Ti + 0.5C$ В СПУТНОМ ПОТОКЕ АЗОТА

Б. С. Сеплярский, Г. Б. Брауэр, А. Г. Тарасов

Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения РАН, 142432 Черноголовка
sepl@ism.ac.ru

Проведено исследование закономерностей горения смесей титана с сажей насыпной плотности, помещенных в кварцевую трубку, при продуве засыпки азотом (спутная фильтрация). Поток азота обеспечивался фиксированным перепадом давлений на торцах засыпки, не превышающим 1 атм. Определена зависимость скорости горения от количества добавки нитрида титана к исходной смеси и от давления на торцах образца. Проведенные эксперименты показали, что при горении порошковой смеси $Ti + 0.5C$ (сажа) в потоке азота помимо фронта карбидизации формируется фронт азотирования. Обнаружены и описаны различные режимы распространения фронтов карбидизации и азотирования. Предложена классификация режимов горения порошковой смеси $Ti + 0.5C$ (сажа) в потоке азота.

Ключевые слова: спутная фильтрация, волна горения, карбонитрид титана.

ВВЕДЕНИЕ

Горение порошков переходных металлов или их смесей с неметаллами (углерод, бор) в азоте является эффективным способом получения как нитридов этих металлов, так и тройных соединений, например таких, как карбонитриды [1–6]. В данной работе исследованы закономерности горения смесей титана с сажей насыпной плотности в условиях продува азотом (спутная фильтрация). Интерес к изучению закономерностей горения этой системы обусловлен прежде всего тем, что конденсированным продуктом реакции может являться карбонитрид титана $TiC_{0.5}N_{0.5}$, который благодаря своим физико-химическим свойствам (высокие значения твердости и модуля упругости, химическая стойкость в агрессивных средах) широко используется для производства безвольфрамовых твердых сплавов и нанесения защитных покрытий.

Особенность горения данной системы состоит в том, что горячие продукты взаимодействия состава $Ti + 0.5C$ сами способны реагировать с азотом в режиме горения. В этом случае в процессе горения смесей наблюдаются два фронта, следующие друг за другом. При этом скорость каждого из фронтов реакции, согласно работам [7, 8], определяется своим механизмом распространения: для фронта карбидизации — конвективно-кондуктивным [7], для фронта азотирования — фильтрационным [8]. Такое стадийное взаимодействие

в режиме горения характерно для гибридных систем, т. е. систем, в которых одновременно могут реализоваться два механизма горения (конвективно-кондуктивный и фильтрационный). Из литературных данных известно [9], что в рамках классических представлений о механизме распространения волн горения путем последовательных экзотермических реакций фронты реакций (в зависимости от соотношения между кинетическими и теплофизическими характеристиками различных стадий) могут быть: 1) пространственно разделенными и взаимодействовать между собой посредством тепловых потоков (режим управления), 2) локализованы в одной зоне (режим слияния), 3) не испытывать никакого взаимного влияния (режим отрыва).

Однако в настоящее время теоретические и систематические экспериментальные исследования закономерностей горения гибридных систем при продуве активного газа практически отсутствуют. Поэтому не известно, как влияют основные определяющие параметры на закономерности протекания отдельных стадий и на режим взаимодействия между ними. Такое состояние проблемы обусловлено сложностью теоретического описания процессов тепло- и массообмена в гибридных системах.

Цель данной работы — систематическое исследование процесса горения состава $Ti + 0.5C$ в спутном потоке азота. Для этого необходимо было решить ряд задач: установить

основные управляющие параметры и выявить их влияние на пределы и закономерности горения; создать экспериментальную установку, позволяющую осуществлять горение порошковых смесей в потоках активного и инертного газов как в стационарном, так и в динамическом режиме (когда величина газового потока и/или его состав меняются в процессе горения).

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для приготовления шихты использовался порошок титана марки ПТС. В этом порошке частицы титана размером менее 43 мкм составляли 50 %, а частицы размером менее 51 мкм — 90 % от общего числа частиц. Полная удельная поверхность частиц титана $0.61 \pm 0.13 \text{ м}^2/\text{г}$. Для приготовления шихты использовалась сажа марки П 804-Т. В применяемом нами порошке сажи частицы размером менее 0.6 мкм составляли 50 %, а частицы размером менее 4.5 мкм — 90 % от общего числа частиц. Полная удельная поверхность частиц сажи $16.25 \pm 0.26 \text{ м}^2/\text{г}$. Фракционный состав и распределение частиц по размеру в порошке определяли по стандартной методике на приборе Analysette 22. Полную удельную поверхность измеряли на приборе Sorbi-M с помощью многоточечного метода БЭТ. В ряде опытов в исходную смесь добавляли порошок $\text{TiN}_{0.95}$. Массовую долю нитрида титана (α) рассчитывали как отношение массы нитрида титана к общей массе смеси. В экспериментах также использовались газы: азот и аргон марки «чистый». Порошки взвешивали на электронных весах Асом Jw-1, перемешивание проводилось в течение 30 мин в смесителе типа «пьяная бочка». Масса исходной смеси во всех опытах составляла $14.00 \pm 0.01 \text{ г}$.

Горение образцов осуществлялось в экспериментальной установке, принципиальная схема которой представлена на рис. 1. Данная установка позволяла сжигать смесь при продувке газовым потоком, измерять расход и давление газа в процессе горения, а также получать видеозаписи процесса горения. Для создания разности давлений на торцах образца, равной 1 атм, применялось два способа: 1) подача газа осуществлялась с верхнего торца при давлении 2 атм через трехпозиционный переключатель, на нижнем торце давление было равно 1 атм; 2) поток газа через образец обеспечивался подключением к нижней части прибор-

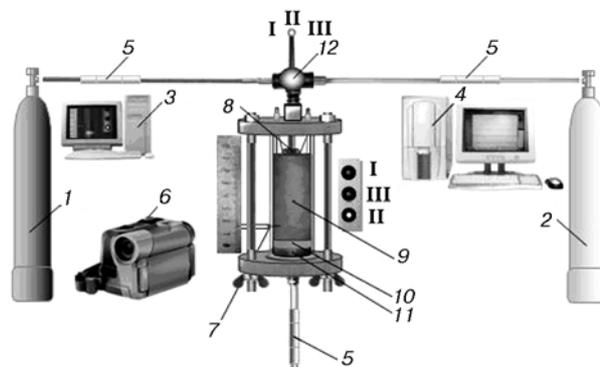


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 — баллон с азотом, 2 — баллон с аргонем, 3 — компьютер для записи видеосигнала, 4 — компьютер для записи показаний датчиков через АЦП, 5 — датчики расхода и давления, 6 — цифровая видеокамера, 7 — вольфрам-рениевая (5/20) термопара, 8 — электрическая спираль, 9 — шихта, 10 — слой минеральной ваты, 11 — металлическая сетка, 12 — трехпозиционный переключатель, позволяющий как менять баллон, из которого осуществляется продувка газом (положение I — азот, II — аргон), так и отключать подачу газа (положение III) в реакционную камеру

ки форвакуумного насоса через газовую магистраль, при этом на верхнем торце давление было равно 1 атм. Выбор абсолютного значения давления газа (не более 2 атм) был обусловлен требованиями к безопасности процесса, так как при таком давлении в случае, например, разрыва газовой магистрали или реакционного сосуда физически невозможно возникновение ударной волны [10].

Эксперименты проводили по следующей схеме. Исследуемую смесь засыпали в прозрачную кварцевую трубку (внешний диаметр 16 мм, длина $H = 90 \text{ мм}$, толщина стенок 1 мм), вертикально установленную на подложку из минеральной ваты (Al_2O_3) высотой 15 мм, под которой находилось кольцо из стальной сетки высотой 10 мм (см. рис. 1). Сигналы датчиков, термопары и светодиодов, информирующих о положении переключателя, через аналого-цифровой преобразователь L-154 фирмы «L-card» в режиме реального времени поступали в компьютер. Горение инициировалось с верхнего торца засыпки электрическим импульсом, подаваемым на спираль. Процесс горения с помощью цифровой видеокамеры Sony DCR-NC96E записывался непосредственно в память компьютера.

Для того чтобы исключить усадку исход-

ной смеси потоком газа в процессе горения и обеспечить получение стабильных результатов, перед каждым опытом проводилось поджатие смеси при закрытом верхнем торце с помощью вакуумирования нижнего торца, а затем продувка засыпки потоком аргона.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В результате проведенных исследований установлено, что горение состава $Ti + 0.5C$ при закрытом верхнем торце (положение III переключателя на рис. 1) сопровождается заметным выделением газа (рис. 2). Газовыделение на этапе зажигания состава примерно в 3.5 раза больше, чем при распространении фронта реакции по образцу, где газовыделение постоянно и равно $66.5 \text{ л/ч} \pm 30 \%$. Отметим также, что газовыделение завершается при достижении фронтом горения нижнего торца образца. Анализ проб газа, взятых из газовой магистрали за датчиками расхода и давления, показал, что газовая смесь на этапе горения более чем на 99.0 % (по массе) состоит из H_2 . Химический анализ исходных компонентов показал, что источником водорода является титан, в котором содержится 0.08 % водорода. В результате обработки видеозаписей процесса горения установлено, что зависимость положения фронта горения от времени представляет собой наклонную прямую линию, а скорость горения составляет 7.5 мм/с .

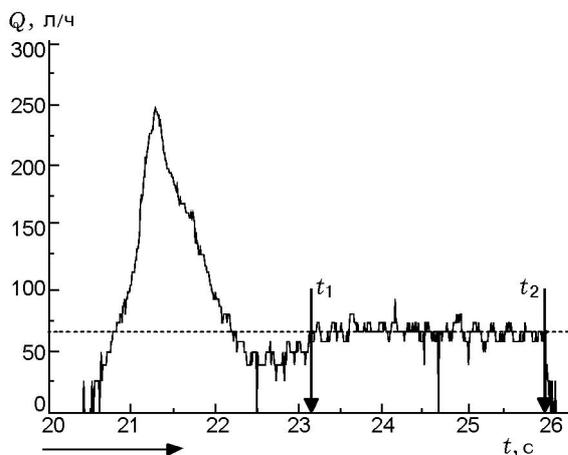


Рис. 2. Изменение во времени расхода газа, выделяющегося при горении:

$t < t_1$ — этап зажигания, $t_1 < t < t_2$ — этап распространения фронта горения (стрелкой указано его направление); пунктирная линия — средний расход газа на этапе горения

Дальнейшие исследования закономерностей горения состава проводили в спутном потоке инертного (аргона) и активного (азота) газов. Смесь $Ti + 0.5C$ способна гореть как в потоке азота, так и в потоке аргона [11, 12] независимо от того, как был создан перепад давлений вдоль засыпки: за счет давления азота в баллоне (2 атм на верхнем торце) либо за счет подключения вакуумного насоса ($p_{\text{верх}} = 1 \text{ атм}$ на верхнем торце и $p_{\text{нижн}} = 0$ на нижнем). Зависимость скорости горения от состава шихты при различных условиях продува представлена на рис. 3. Следует отметить, что знание закономерностей горения состава в потоке инертного газа (аргона) представляет самостоятельный интерес, но также необходимо и для выяснения закономерностей горения в потоке азота. Как видно из рис. 3, при $\alpha = 0$ продув системы $Ti + 0.5C$ насыпной плотности аргоном приводил к заметному ускорению горения: с 7.5 до 9.6 мм/с при $p_{\text{верх}} = 2 \text{ атм}$ и $p_{\text{нижн}} = 1 \text{ атм}$ и с 7.5 до 10.7 мм/с при $p_{\text{верх}} = 1 \text{ атм}$ и $p_{\text{нижн}} = 0$. При продуве этой же смеси потоком азота скорость горения снижалась с 7.5 до 6.2 мм/с при $p_{\text{верх}} = 2 \text{ атм}$ и $p_{\text{нижн}} = 1 \text{ атм}$ и увеличивалась с 7.5 до 8.7 мм/с при $p_{\text{верх}} = 1 \text{ атм}$ и $p_{\text{нижн}} = 0$. Рассмотрим более подробно особенности горения состава $Ti + 0.5C$ в потоке инертного (аргона) и активного (азота) газов.

При горении состава в потоке аргона (положение II переключателя на рис. 1), как и в [11], происходила усадка смеси. По результатам обработки видеозаписей процесса горения установлено, что продольный размер образца (усадка) изменялся за фронтом горения. Рентгенофазовый анализ продуктов горения смеси $Ti + 0.5C$ (сажа) в условиях продува инертным газом показал, что, как и в [11], конденсированный продукт состоит из смеси двух фаз карбида титана TiC_m ($m = 5/6; 1$) и титана. Анализ проб газа, взятых из газовой магистрали за датчиками расхода и давления, показал, что на этапе горения в газовой фазе присутствует аргон, что свидетельствует о проницаемости фронта горения для потока инертного газа. Подтверждением этому служит и тот факт, что при $p_{\text{верх}} = 2 \text{ атм}$ и $p_{\text{нижн}} = 1 \text{ атм}$ зависимость расхода газа от времени не имела горизонтального участка, а сам расход увеличивался по мере приближения фронта горения к нижнему торцу и всегда был больше, чем поток газа на горизонтальном участке при закрытом верхнем торце.

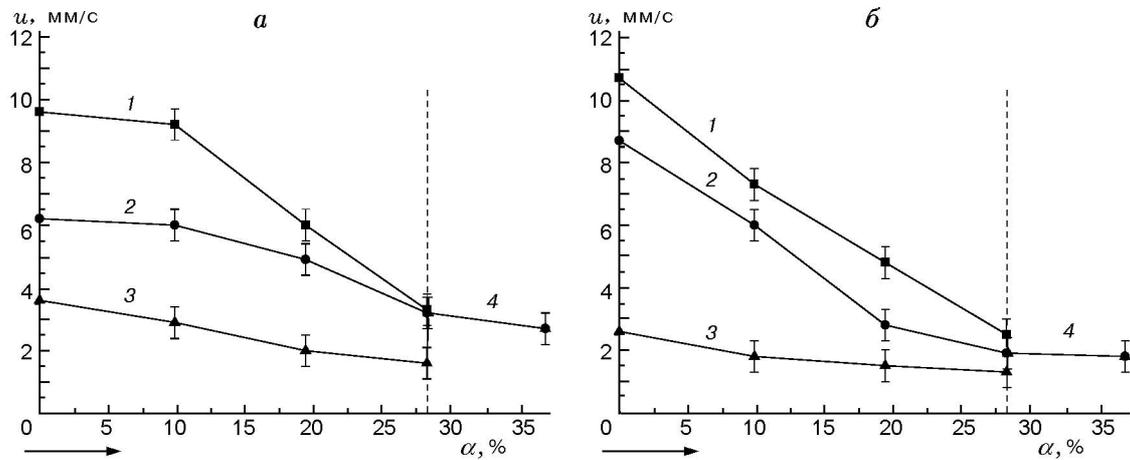


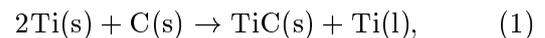
Рис. 3. Зависимость скорости горения шихты от массового содержания TiN в шихте (α) при $p_{\text{верх}} = 2$ атм, $p_{\text{нижн}} = 1$ атм (а) и $p_{\text{верх}} = 1$ атм, $p_{\text{нижн}} = 0$ (б):

1 — скорость фронта карбидизации в потоке аргона, 2 — скорость фронта карбидизации в потоке азота, 3 — скорость фронта азотирования, 4 — скорость совместного распространения фронта карбидизации и азотирования; вертикальная линия — предел распространения фронта горения в потоке аргона

При горении смеси Ti + 0.5C (сажа) в потоке азота (положение I переключателя на рис. 1) на видеозаписях процесса горения наблюдалось два отличающихся по яркости фронта, следующих друг за другом. Покадровый анализ видеозаписей процесса горения показал, что после инициирования формируется яркая зона, которая затем распространяется вдоль засыпки. На некотором расстоянии от верхнего торца засыпки происходил распад зоны горения на два фронта с четко отличимой границей между ними. После распада на видеозаписях процесса горения отчетливо видно распространение одного фронта горения, за которым, все более отставая, движется второй, более яркий фронт горения. Впервые подобное распространение фронтов для данной смеси обнаружено нами и описано в работе [12]. В той же работе было высказано предположение, что первый является фронтом карбидизации, а второй — азотирования. В данной работе представлен более детальный анализ последовательности превращения титана в волне горения в предположении существования двухфронтной структуры. Термодинамический расчет двухфронтной структуры проведен с помощью программы «Thermo». В этой программе системы уравнений для определения равновесного состава получены при использовании принципа минимума термодинамического потенциала (энергия Гиббса). В расчетах предполагалось, что исходные компонен-

ты не имеют примесей, а сам процесс превращения является адиабатическим.

В первом фронте при взаимодействии титана с углеродом достигается температура $T_{\text{calc}} = 1840$ °C и образуется смесь, состоящая из твердого карбида титана и расплава титана:



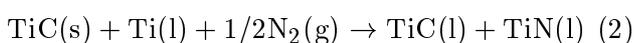
где символы (s) и (l) относятся соответственно к твердому и жидкому состояниям вещества.

Как видно из расчетов, в первом фронте (взаимодействие титана с углеродом) температура горения превышает температуру плавления титана (1660 °C) [13]. Тем самым достигаются необходимые и достаточные условия для реализации конвективно-кондуктивного режима горения [7].

В принципе, возможно дальнейшее взаимодействие образующегося TiC(s) с жидким титаном с образованием карбида титана Ti₂C(s). Однако, поскольку коэффициент диффузии титана в TiC(s) низкий [14], прежде чем этот процесс пройдет на значительную глубину, жидкий титан провзаимодействует с азотом во фронте азотирования. Следовательно, количество образующегося Ti₂C определяется временем существования смеси TiC(s) + Ti(l) до момента подхода второго фронта. Следует отметить, если бы из смеси TiC(s) + Ti(l) образовывался стабильный карбид Ti₂C, имеющий упорядоченную решетку [15], то протекание ре-

акции азотирования во фронтальном режиме было бы невозможно, поскольку она является эндотермической (как показывает термодинамический расчет).

Во втором фронте при взаимодействии нагретых $TiC(s) + Ti(l)$ с газообразным азотом, согласно термодинамическим расчетам, достигается температура $T_{calc} = 3300$ °С и образуется смесь, состоящая из жидких карбида и нитрида титана:



(символ (g) относится к газообразному состоянию вещества). Так как TiC и TiN при максимальной расчетной температуре находятся в жидком состоянии, то возможно их дальнейшее взаимодействие друг с другом с образованием однофазного продукта $TiC_{0.5}N_{0.5}$.

Для экспериментального подтверждения указанной выше стадийности превращения титана в продукт проводили во время горения замену потока активного газа (азот) инертным (аргон). Затем исследовали конденсированный продукт и пробы газовой фазы. Как показали результаты экспериментов, при замене азота на аргон более яркий фронт менее чем за 1 с прекращал свое распространение. Визуально место остановки второго фронта можно определить по смене окраски конденсированного продукта. В дальнейшем прекращение подачи азота во время горения использовалось для изучения распределения элементов, а также фазового и структурного составов вдоль образца. По данным химического анализа установлено, что та область, где не было яркого (второго) фронта, не содержит азота и состоит из карбида титана TiC_m ($m = 5/6; 1$) и титана. Азот обнаружен только в той области, где во время горения распространялся более яркий фронт — фронт азотирования. Следует отметить, что полнота азотирования в этой области не достигает 100 %, хотя согласно представлениям теории фильтрационного горения [8] при спутном потоке активного газа глубина превращения должна быть полной. В пробах газовой фазы, отобранных на участке от момента возникновения фронта азотирования до его выхода на нижней торец, азот не обнаружен. Это свидетельствует об отсутствии проскока газообразного азота через второй фронт. При давлении азота на верхнем торце 2 атм, а на нижнем 1 атм расход примесного газа в процессе горения был постоянным (за исключением

этапа зажигания) и численно соответствовал расходу на горизонтальном участке при горении состава $Ti + 0.5C$ при закрытом верхнем торце (66.5 л/ч ± 30 %), что дополнительно указывает на непроницаемость фронта азотирования для выделяющегося во время горения примесного газа и на отсутствие проскока газообразного азота через фронт. Таким образом, полученные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что в первом фронте протекает реакция титана с углеродом, а во втором (более ярком) — взаимодействие полупродукта с газообразным азотом.

Однако для синтеза карбонитрида титана (химическая формула $TiC_{0.5}N_{0.5}$) из $Ti + 0.5C$ при горении смеси в потоке азота необходимо повышение содержания азота в конденсированном продукте реакции. В данной работе этого достигали путем введения в состав смеси твердого азотирующего элемента (нитрида титана). Установлено, что введение добавки нитрида титана позволило изменять как содержание азота в конденсированном продукте, так и режимы распространения фронтов карбидизации и азотирования в спутном потоке азота. По данным рентгенофазового анализа однофазные соединения $TiC_{0.5}N_{0.5}$ обнаружены в смесях с массовым содержанием нитрида титана в смеси $15 \div 25$ %.

Как видно из рис. 3, при увеличении массовой доли нитрида титана в смеси скорости распространения фронтов карбидизации и азотирования снижаются. Несмотря на то, что скорость горения разбавленной смеси в потоке аргона выше, чем в потоке азота, предел горения в потоке аргона достигается при меньшем содержании нитрида титана в смеси. Рассмотрим этот факт более подробно. Прежде всего, следует отметить, что наблюдаемое в опытах увеличение скорости горения смеси в спутном потоке аргона согласуется с выводами конвективно-кондуктивной теории горения (ККТГ) и не может быть объяснено прогревом порошковой смеси инертным газом (эффект Алдушина — Сеплярского [6]). Это утверждение подтверждают (как и в [11]) расчеты, проведенные по формулам, известным из теории фильтрационного горения [8]. Согласно расчетам, для условий наших экспериментов перепад давлений и соответствующий ему поток инертного газа настолько незначительны, что не должны приводить к заметному увеличению скорости распространения фронта горения

(фронта карбидизации). Напротив, с позиции ККТГ [7] продув смеси инертным газом должен заметно изменять скорость фронта горения. В рамках ККТГ процесс распространения зоны реакции представляется следующим образом. Жидкий расплав под действием капиллярных сил и перепада давлений примесных газов до и после фронта горения проникает в исходную пористую шихту, состоящую из мелкодисперсных компонентов, что приводит к многократному увеличению поверхности контакта исходных реагентов и соответственно резкому росту скорости реакции. При взаимодействии исходных реагентов выделяется большое количество тепла и образуются как конденсированные продукты, не обладающие текучестью при температуре горения, так и расплав. Под действием капиллярных сил и перепада давления примесных газов расплав перетекает в соседний слой, и процесс повторяется. При горении смеси в потоке аргона (инертного газа) за фронтом карбидизации (первый фронт) давление больше, чем при горении смеси в потоке азота, так как реакция с азотом идет с его поглощением. Поэтому, согласно представлениям ККТГ, в экспериментах скорость распространения фронта карбидизации должна быть больше при горении смеси в потоке аргона, чем в потоке азота.

Тот факт, что предел горения смеси в потоке аргона достигался при меньшем, чем в потоке азота, содержании нитрида титана в смеси, позволяет сделать предположение о том, что это расширение предела горения связано с взаимодействием между фронтами карбидизации и азотирования. Следовательно, при массовом содержании TiN в смеси $28 \div 37\%$ (при котором смесь неспособна самостоятельно гореть в потоке аргона) скорость распространения фронта карбидизации определяется потоком тепла из фронта азотирования. Для доказательства этого предположения проведен ряд экспериментов с различным содержанием TiN в смеси при смене потока (азота на аргон) или отключении подачи газа в процессе горения. Установлено, что прекращение потока азота через засыпку для составов с содержанием TiN $28 \div 37\%$ приводит к прекращению горения. Следует отметить, что содержание азота в конденсированном продукте для составов с указанной добавкой TiN ($28 \div 37\%$) соответствовало расчетному, полученному в предположении полного потребления углерода в реакции карбидизации. Этот факт позволяет сделать

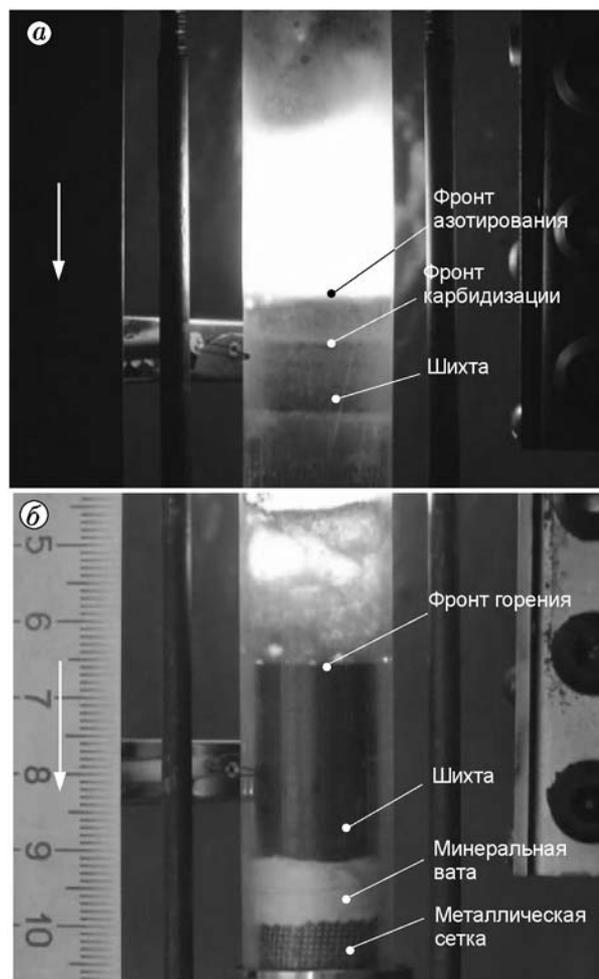


Рис. 4. Фотография процесса горения смеси с добавкой нитрида титана в потоке азота ($p_{\text{верх}} = 2 \text{ атм}$, $p_{\text{нижн}} = 1 \text{ атм}$):

a — скорость фронта карбидизации больше скорости фронта азотирования ($\alpha = 19.3\%$), *б* — скорость фронта карбидизации равна скорости фронта азотирования ($\alpha = 37\%$); стрелка — направление распространения фронта горения

вывод о том, что и в этом случае реализуется описанная выше последовательная схема превращений исходного титана в карбонитрид. Для составов с содержанием TiN менее 28% прекращение подачи азота в процессе горения приводило к остановке только фронта азотирования. При быстром возобновлении подачи азота фронт азотирования восстанавливался. Специальные эксперименты показали, что если горение смеси осуществлять в потоке аргона, а в момент достижения фронтом карбидизации нижнего торца засыпки подавать азот, то фронт азотирования формируется в нижней

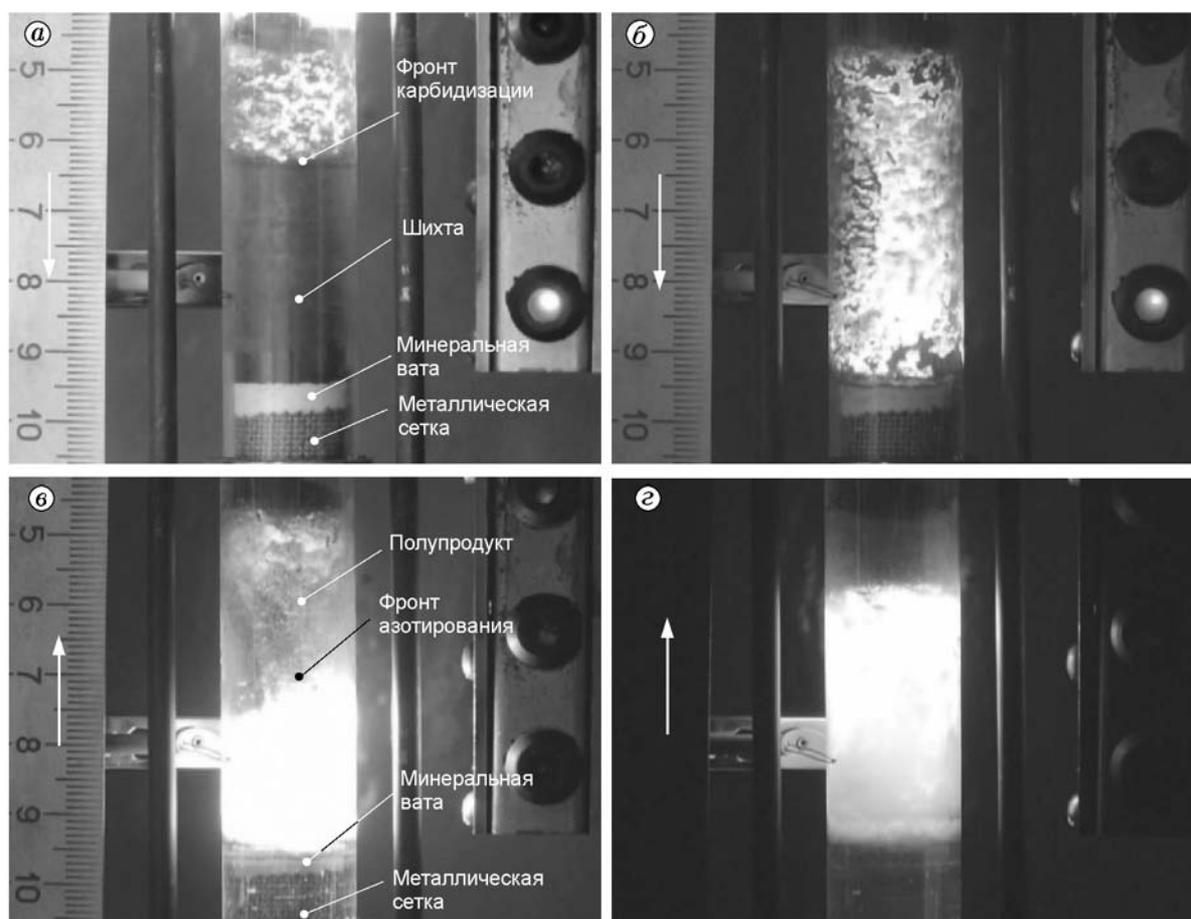


Рис. 5. Фотографии процесса горения смеси $Ti + 0.5C$ в динамических условиях ($p_{верх} = 1$ атм, $p_{нижн} = 0$):

а — распространение фронта карбидизации (горение в потоке аргона), *б* — фронт карбидизации подошел к нижнему торцу образца (горение смеси в потоке аргона), *в*, *г* — распространение фронта азотирования навстречу потоку азота (снизу вверх); стрелка — направление распространения фронта горения

части засыпки и распространяется по образцу в режиме встречной фильтрации.

Суммируя полученные данные, можно выделить три основных режима горения.

1. Режим управления через газовый поток. Направление распространения фронтов карбидизации и азотирования совпадает с направлением подачи газа, а сами фронты пространственно разделены и могут взаимодействовать между собой посредством газовых потоков (степень разбавления менее 28 %).

2. Режим управления с помощью теплового потока. Направление и скорость распространения фронтов карбидизации и азотирования совпадают с направлением подачи газа, в то же время взаимодействие протекает в одной зоне

(степень разбавления от 28 ÷ 37 %).

3. Режим встречного азотирования. Направления распространения фронтов карбидизации и азотирования противоположны, и они не испытывают никакого взаимного влияния. В этом режиме направление распространения фронта карбидизации совпадает с направлением подачи газа, в то время как направление распространения фронта азотирования противоположно направлению подачи газа (реализуется при начале подачи азота после прогорания исходной смеси и при степени разбавления менее 28 %).

Фотографии процесса горения для этих режимов представлены на рис. 4, 5.

ВЫВОДЫ

Создана экспериментальная установка, позволяющая осуществлять процесс гибридного горения как в стационарном, так и в динамическом режиме.

Изучены закономерности горения смеси $Ti + 0.5C$ в потоках азота и аргона.

Расчетными и экспериментальными методами доказана следующая последовательность превращения титана в волне горения: первый фронт — фронт карбидизации, второй — фронт азотирования.

Изучено влияние добавок нитрида титана на закономерности горения и состав конечных продуктов. Установлено, что скорость горения разбавленной смеси в потоке аргона выше, чем в потоке азота, и предел горения в потоке аргона достигается при меньшем содержании нитрида титана в смеси.

Показано, что при давлении азота менее 2 атм можно синтезировать однофазный карбонитрид титана с химической формулой $TiC_{0.5}N_{0.5}$.

Предложена классификация режимов горения порошковой смеси $Ti + 0.5C$ (сажа) в потоке азота.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мержанов А. Г., Боровинская И. П., Володин Ю. Е. Горение пористых образцов металлов в газообразном азоте и синтез нитридов // Отчет ИХФ АН СССР. — 1971.
2. Мукасьян А. С., Шугаев В. А., Кирьяков Н. В. Влияние газообразных флюидных фаз на горение металлов в азоте // Физика горения и взрыва. — 1993. — Т. 29, № 1. — С. 9–13.
3. Авакян А. Б., Баграмян А. Р., Боровинская И. П., Григорян С. Л., Мержанов А. Г. Синтез карбонитридов переходных металлов // Процессы горения в химической технологии и металлургии. — Черноголовка, 1975. — С. 98–113.
4. Degreve J., Puszynski J., Hlavachek V. Synthesis of nitrides and hydrides by filtration combustion // Mater. Process. by SHS / K. A. Gabriel et al. (Eds). — Watertown, MA, 1987. — MTL-SP-87-3. — P. 247–278.
5. А. с. 684849, 1976. Способ получения нитридов переходных металлов / Мержанов А. Г., Юхвид В. И., Боровинская И. П.
6. Мержанов А. Г., Мукасьян А. С. Твердопламенное горение. — М.: Торус Пресс, 2007. — С. 336.
7. Сеплярский Б. С. Природа аномальной зависимости скорости горения безгазовых систем от диаметра // Докл. РАН. — 2004. — Т. 396, № 5. — С. 640–643.
8. Алдушин А. П., Сеплярский Б. С. Распространение волны экзотермической реакции в пористой среде при продуве газа // Докл. АН СССР. — 1978. — Т. 241, № 1. — С. 72–75.
9. Мержанов А. Г., Хайкин Б. И. Теория волн горения в гомогенных средах. — М.: Ин-т структурной макрокинетики РАН, Черноголовка, 1992. — С. 89–107.
10. Дейч М. Е. Техническая газодинамика. — 2-е изд., перераб. — М.; Л.: Госэнергоиздат, 1961. — С. 667.
11. Сеплярский Б. С., Вадченко С. Г., Костин С. В., Брауэр Г. Б. Закономерности горения смесей $Ti + 0.5C$ и $Ti + C$ насыпной плотности в спутном потоке инертного газа // Физика горения и взрыва. — 2009. — Т. 45, № 1. — С. 30–37.
12. Сеплярский Б. С., Костин С. В., Брауэр Г. Б. Динамические режимы горения слоевой системы $Ti-(Ti + 0.5C)$ в спутном потоке азота // Физика горения и взрыва. — 2008. — Т. 44, № 6. — С. 44–51.
13. Справочник химика. Т. 2: Основные свойства неорганических и органических соединений / гл. ред. Б. П. Никольский. — 2-е изд., доп. и перераб. — Л.: Химия, 1964. — С. 222, 223.
14. Петров А. П. Карбид титана. Получение, свойства, применение. — М.: Металлургия, 1987. — С. 216.
15. Холлек Х. Двойные и тройные карбидные и нитридные системы переходных металлов: справ. изд. / пер. с нем. под ред. Ю. В. Левинского. — М.: Металлургия, 1988. — С. 319.

Поступила в редакцию 20/VI 2010 г.